



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

Tang, Fen; Guerrero, Josep M.; Zhou, Xiao; Ma, Tianyi; Vasquez, Juan Carlos

*Published in:*  
Dianli Xitong Zidonghua

*DOI (link to publication from Publisher):*  
[10.7500/AEPS20130816010](https://doi.org/10.7500/AEPS20130816010)

*Publication date:*  
2014

*Document Version*  
Early version, also known as pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*  
Tang, F., Guerrero, J. M., Zhou, X., Ma, T., & Vasquez, J. C. (2014). . *Dianli Xitong Zidonghua*, 38(8), 15-22.  
<https://doi.org/10.7500/AEPS20130816010>

#### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

#### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

DOI: 10.7500/AEPS20130816010

# 一种可实现微网系统快速平滑并网的主动同步控制策略

唐 芬<sup>1</sup>, Josep M. GUERRERO<sup>2</sup>, 周 啸<sup>1</sup>, 马添翼<sup>1</sup>, Juan C. VASQUEZ<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学国家能源主动配电网技术研发中心, 北京市 100044; 2. 丹麦奥尔堡大学能源技术系, 奥尔堡 9220, 丹麦)

**摘要:**为实现微网系统从孤岛运行模式到并网运行模式的平滑过渡,微网与主电网的同步是首要考虑的问题。提出了一种新型基于锁相环原理的主动同步控制策略,该方法通过主动调节微网母线电压的频率、相角和幅值跟踪主电网电压,从而减小并网时刻的电压偏差,达到孤岛模式向并网模式的平滑过渡。同时,采用电压矢量叉积作为鉴相器,微网频率和相角可同时快速有效地跟踪电网频率和相角。并且该方案不需传递相位等时域信号,仅需依赖于低带宽的通信,原理简单、易于实施。最后,实时硬件在环仿真与实验结果表明,该控制方案可实现微网快速平滑并网。

**关键词:**锁相环;微网(微电网);并网控制;同步;分层控制

## 0 引言

近几年,微网概念备受关注,被视为利用分布式能源的最佳途径<sup>[1-3]</sup>。微网一般具有并网和孤岛 2 种工作模式<sup>[4]</sup>。为保证系统内关键负荷持续可靠供电,并网与孤岛运行模式间的无缝切换显得尤为重要<sup>[5]</sup>。而要实现微网从孤岛到并网运行模式的平滑过渡,减小并网时刻瞬态,微网与主电网电压的同步是首要考虑的问题,即在合闸前,微网母线电压与主电网电压在幅值、相角和频率上需尽量匹配。IEEE Std 1547.4—2011 列出了三类并网(reconnection mode)方法:主动同步、被动同步和停机转换<sup>[6]</sup>。最后一种方案简单、成本低,但在切换过程中,会导致微网内关键负荷的短时供电中断。被动同步方案无主动相位同步控制,如果频率偏差较小,将需等待较长时间。而主动同步控制方法,通过控制机理主动调节微网电压跟踪主电网电压,因此能快速有效地实现同步。

针对微网从孤岛到并网模式的过渡问题,文献[7]提出基于本地锁相环(PLL)和虚拟阻抗设计的无同步并网策略,但虚拟阻抗的取值较难选择。文献[8-10]提出通过改变控制模式的方法来达到无缝切换,但要么算法复杂且易引起稳定性问题;要么非无缝切换,存在短时的供电中断或电能质量下降。文献[11-13]提出让微网直接跟踪主电网的幅值和相角信号,但这类方法或需传递相位等时域信号,需

要快速通信;或需在本地控制器中同时采集主电网和微网电压信号,在实际工况中常因主电网和本地控制器的距离难于实现。文献[14]提出在中央控制器中采用幅值和相位补偿器对偏差进行控制,其输出送到本地控制器,同步平移各单元的下垂曲线来达到与电网的同步。为减小通信量,文献[15]提出中央控制器仅给出调节方向,本地控制器根据接收的方向按照预设表格平移下垂曲线,但逻辑比较复杂。另一方面,为改善频率和相角同步性能,文献[16-20]提出在频率同步后,切换至相位同步模式,因频率、相位分时段调节,整体调节时间仍较长,且相位调节也会对原有的频率同步造成影响,在切换逻辑或频率扰动值设计上需予以考虑。文献[21-22]采用 3 个调节器同时调节幅值、相角、频率偏差,可实现快速稳定的转换。但频率和相角调节器存在相互影响。

微网孤岛运行时,其母线电压频率和幅值由系统内分布式资源和负荷共同决定。其并网同步控制可能涉及多个单元协调控制,比较适合采用分层控制中的第 2 层控制器<sup>[23]</sup>。因此,本文首先介绍微网分层控制结构和并网准同期检定要求。其次对并网时刻进行建模,给出了影响并网瞬态的因素。在此基础上,考虑到电压矢量的叉积能同时反映频率和相角偏差,提出了基于 PLL 原理的主动同步控制策略,其中频率和相角采用同一调节器,可自适应地同时调节,从而快速有效地跟踪电网频率和相角。另外,对调节器进行了归一化处理,使其适应不同的电压等级。随后,给出了其主要参数的设计方法。最后,通过实时硬件在环仿真和实验验证了所提控制策略的有效性。

收稿日期: 2013-08-16; 修回日期: 2013-12-24。

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A306)。

1 微网分层控制

微网从概念上讲,一般是指由分布式资源(DR)和本地负荷组成的电气上互联、控制上协调运行,具有自我控制、保护和管理的小型发电系统,其典型结构如图 1 所示。根据转换开关(STS)状态的不同,微网可运行于并网模式或孤岛模式,或 2 种模式之间的过渡过程。为满足各模式下不同时间尺度与重要性的要求,实现微网安全可靠与经济优化运行,分层控制是常用的方案。其主要分为 3 个控制层。

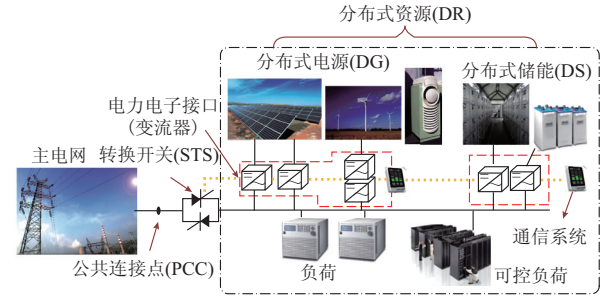


图 1 典型微网结构  
Fig.1 Typical microgrid configuration

1.1 一次控制

一次控制(primary control level)一般基于本地信息实施在本地控制器内。其为本地控制器内部提供指令、协调短期的功率平衡。本地控制器直接面向 DR 系统。由于基于变流器接口的 DR 系统可提供快速控制,可用于并网前微网电压调节,本文将重点针对该类 DR 系统展开研究。其中变流器采用三相电压源变流器(VSC),其控制策略常可分为电压控制模式(VCM-VSC)和电流控制模式(CCM-VSC)<sup>[24-26]</sup>。因本地 PLL 的存在,基于 CCM-VSC 的单元将自动与所联的电网同步,其对微网电压稳定的影响类似于负荷扰动。而基于 VCM-VSC 的单元主要功能是在孤岛运行状态下为微网提供频率和电压支撑,因此可作为主动同步方案的执行者。

1.2 二次控制

二次控制(secondary control level)一般采用中央控制器,用于补偿因一次控制导致的电压和频率偏差,使其恢复至额定值。与一次控制相比,具有较慢的动态响应。并网同步协调控制和准同期检定一般实施在该层。当准同期检定条件满足后给出合闸信息,STS 闭合,从而微网切换至并网运行模式。在该过渡阶段,可通过适当的二次控制算法主动调节 VCM-VSC 的电压指令,使微网电压跟踪主电网电压,实现 2 种运行模式的无缝切换。

1.3 三次控制

三次控制(tertiary control level)一般用于控制

微网和主电网的潮流以及微网内资源的调度,实现微网的经济优化运行。

2 准同期检定要求

按照 IEEE Std 1547—2003 标准<sup>[27]</sup>,微网并网时需满足表 1 的准同期参数限制。

表 1 IEEE Std 1547—2003 准同期参数限制  
Table 1 IEEE Std 1547—2003 synchronization parameter limits

系统容量/kVA	频率偏差/Hz	电压偏差/%	相角偏差/(°)
0~500	0.3	10	20
500~1 500	0.2	5	15
1 500~10 000	0.1	3	10

用  $v_m$  表示微网电压矢量,用  $v_g$  表示主电网电压矢量,则 2 个电压矢量的瞬时电压偏差为:

$$|v_m - v_g| = |V_m e^{j\omega_m t + \theta_{m0}} - V_g e^{j\omega_g t + \theta_{g0}}| \quad (1)$$

式中: $V_m, \omega_m, \theta_{m0}$ 和 $V_g, \omega_g, \theta_{g0}$ 分别为微网和主电网电压的幅值、角频率和初始相角。

若两者具有相同的电压幅值  $V_N$  和角频率  $\omega_N$ , 则

$$|v_m - v_g| = 2V_N \left| \sin\left(\frac{\theta_{m0} - \theta_{g0}}{2}\right) \right| \quad (2)$$

由表 1 可知,若系统容量在 0~500 kVA,则并网前相角偏差应小于 20°。由式(2)可得,最大电压偏差将为 34.7% $V_N$ 。然而,因大量电力电子变流器的应用,微网通常具有惯性小和过载能力差等特点。为保证微网安全和在 2 种运行模式之间的平滑过渡,从微网角度而言,并网有时需满足更严苛的标准。

由式(2)可知,若想瞬时电压偏差在 5% $V_N$  以内,则相位偏差需在 2.86°以内。另外,为确保稳定操作和防止干扰,这 3 个差值需维持在该限制内一段时间(如 10 个基波周期)。因此,本文采用如图 2 所示准同期检定条件。其中  $f_m$  和  $f_g$  分别为微网与电网频率。

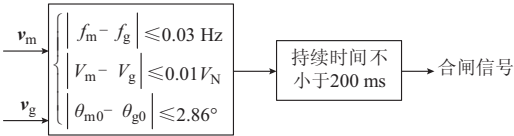


图 2 准同期检定条件  
Fig.2 Synchronization check condition

3 系统建模

3.1 基于变流器接口的微网系统建模

依据上述分析,基于变流器接口的微网系统简化结构如图 3 所示,其中  $z_f$  为变流器侧滤波电感阻

抗;  $z_{\text{Cf}}$  为滤波电容阻抗;  $z_{\text{g}}$  为网侧电感与线路阻抗;  $V_{\text{C}}$  为滤波电容电压;  $I_{\text{L}}$  为变流器侧滤波电感电流;  $I_{\text{out}}$  为输出电流; 下标  $i = 1, 2, \dots, n$ , 代表 VCM-VSC1 至 VCM-VSC $n$  参数;  $I_{\text{g}}$  为电网电流;  $z_{\text{i}}$  为电网阻抗 (表征电网的坚挺程度);  $z_{\text{load}}$  为微网集总负荷。

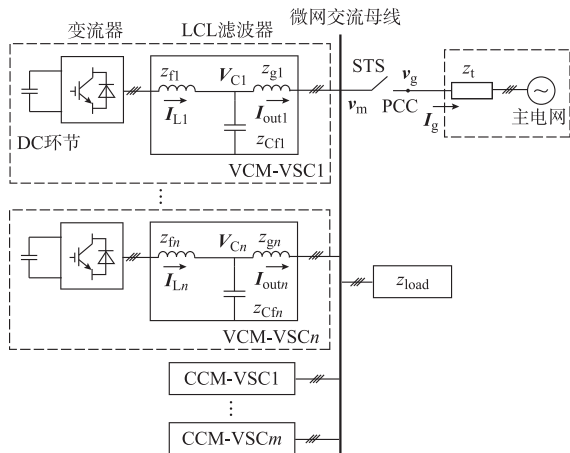


图3 微网简化结构

Fig.3 Simplified structure of microgrid

若在合闸时刻,微网与主电网之间的电压偏差为  $\Delta v$ ,其中  $\Delta v = v_m - v_g$ ,根据叠加定理, $\Delta v$  单独作用产生的系统响应可用图 4 等效电路分析,其中  $z_o$  为 VCM-VSC 总等效输出阻抗; $z_{cl}$  为 VCM-VSC 考虑虚拟阻抗后的总等效闭环输出阻抗;相对于网络阻抗和变流器的输出阻抗,负荷阻抗(不管是实际负荷还是 CCM-VSC)一般较大,因此在分析时可忽略。

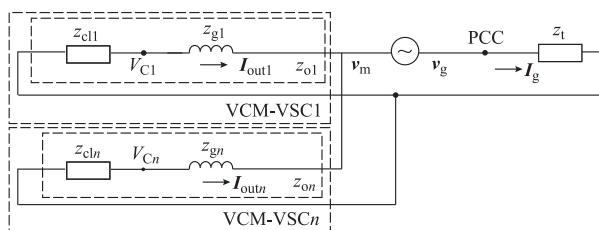


图 4  $\Delta v$  单独激励时等效电路  
Fig.4 Equivalent circuit with independent excitation of  $\Delta v$

因此,注入电网的电流为:

$$\mathbf{I}_g = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\alpha_t + \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{g1}} + \frac{1}{\alpha_{g2}} + \dots + \frac{1}{\alpha_{gn}}}} \quad (3)$$

由式(3)可知,并网时刻瞬态主要有 2 个影响因素:瞬时电压偏差和总的系统阻抗。总系统阻抗主要由 VCM-VSC 等效输出阻抗  $z_{\text{vcm}} \sim z_{\text{vsc}}$  和电网线路

阻抗决定。而  $z_{ol} \sim z_{on}$  一般取决于 VCM-VSC 的控制策略。同时,若微网内多个 VCM-VSC 并联运行,则  $z_{ol} \sim z_{on}$  等效并联阻抗主要由最小的输出阻抗值决定。

### 3.2 VCM-VSC 建模

VCM-VSC 常用的一次控制结构如图 5 所示, 电压指令由下垂控制给出(带限幅环节, 受限于最大幅值和频率偏差)。电压控制器采用电压外环电流内环的双闭环结构, 为实现多台均流, 加入虚拟阻抗控制。

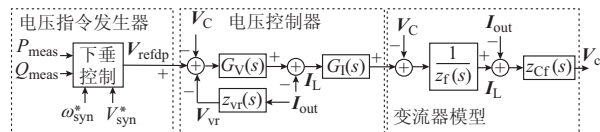


图 5 VCM-VSCs 建模  
Fig.5 Modeling of VCM-VSCs

下垂控制采用  $P-f, Q-V$  控制, 其控制方程为:

$$\begin{cases} \omega = \omega^* + \omega_{\text{syn}}^* - k_p P_{\text{meas}} = \omega^* + \omega_{\text{syn}}^* - \frac{k_p P \omega_c}{s + \omega_c} \\ V = V^* + V_{\text{syn}}^* - k_q Q_{\text{meas}} = V^* + V_{\text{syn}}^* - \frac{k_q Q \omega_c}{s + \omega_c} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\omega$  和  $V$  分别为输出角频率和相电压幅值;  $\omega^*$  和  $V^*$  分别为空载角频率和电压幅值;  $\omega_{\text{syn}}^*$  和  $V_{\text{syn}}^*$  分别为二次控制层主动同步控制给出的角频率和电压调节量;  $k_p$  和  $k_q$  分别为角频率和电压下垂增益;  $P$ 、 $Q$  和  $P_{\text{meas}}$ 、 $Q_{\text{meas}}$  分别为滤波前、后有功功率和无功功率;  $\omega_c$  为滤波器截止角频率。

电压和电流调节器均采用比例谐振+谐波补偿 (PR+HC), 并且在主要频率点单独设计虚拟阻抗参数, 其电压、电流、虚拟阻抗传递函数  $G_V(s)$ ,  $G_I(s)$ ,  $z_{vr}(s)$  表达式见附录 A。另外, 受限于控制带宽, 谐波补偿中, 谐波次数为  $h \leq 13$ 。

一般而言,电压指令发生器的控制带宽要低于电压控制器。不考虑指令变化,微网电压对下垂控制环输出指令  $\mathbf{V}_{\text{refdp}}$  的跟踪性能可采用戴维南等效为:

$$\mathbf{v}_m = G_{cc} \mathbf{V}_{\text{refdp}} - z_o \mathbf{I}_{\text{out}} = G_{cc} \mathbf{V}_{\text{refdp}} - (z_c + z_{\text{vreg}} + z_g) \mathbf{I}_{\text{out}} \quad (5)$$

式中:  $G_{cc}$  为闭环增益;  $z_c$  为闭环阻抗;  $z_{vreq}$  为等效虚拟阻抗, 表达式见附录 B。

可见,  $z_{o1} \sim z_{on}$  的特性主要由 3 个因素决定:  $z_c$ ,  $z_{vreq}$ ,  $z_g$ 。因内环控制系统相对于主要谐波频率点高的控制带宽,  $G_{cc}$  和  $z_c$  的幅值分别在 1 和 0 左右,  $z_{vreq}$  幅值约为设计值。如无虚拟阻抗, 阻抗值主要由闭环传递函数决定, 主要频率点阻抗将在 0 附近。而通过虚拟阻抗, 可重塑主要频率点的输出阻抗。各阻抗波特图如图 6 所示。图中:  $z_{c1} = z_c + z_{vreq}$



通过感性虚拟阻抗  $X_{vr}$  的设置,  $z_o$  可呈现感性<sup>[28]</sup>。忽略  $z_c$  和线路电阻,  $z_o$  值约为总感抗量  $X \approx X_g + X_{vr}$ 。

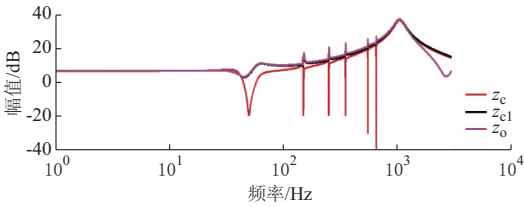


图6 VCM-VSCs 等效阻抗  
Fig.6 Equivalent impedances of VCM-VSCs

3.3 VCM-VSC 控制参数对合闸瞬态影响分析

定义下垂控制器输出电压的幅值和相角分别为  $V$  和  $\theta_{dp}$ , 忽略线路电阻和线路功率, 则有

$$\begin{cases} P \approx \frac{3}{2} \frac{VV_m}{X} \sin(\theta_{dp} - \theta_m) \approx \frac{3}{2} \frac{VV_m}{X} (\theta_{dp} - \theta_m) \\ Q \approx \frac{3}{2} \frac{VV_m \cos \theta_{dp} - V_m^2}{X} \approx \frac{3}{2} \frac{V_m}{X} \Delta V - \frac{XP^2}{3VV_m} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\theta_m$  为微网相角。

假设内环控制器能实时跟踪下垂指令, 由式(4)、式(6)可得, 准同期同步参数角频率、幅值、相角偏差  $\Delta\omega_{mg}$ ,  $\Delta V_{mg}$ ,  $\Delta\theta_{mg0}$  对并网时刻功率影响如图7所示, 其中  $P_0$  为并网前有功功率。

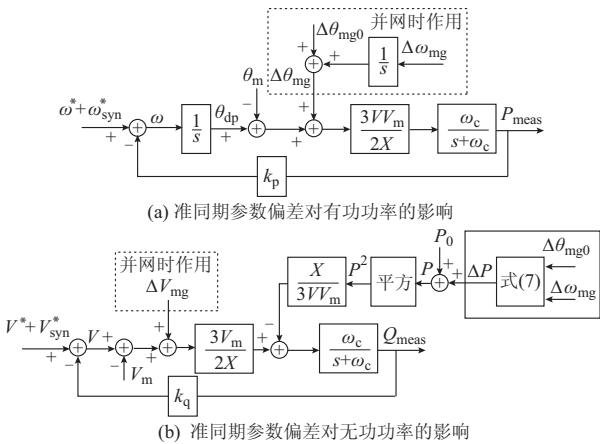


图7 准同期参数对功率的影响  
Fig.7 Influence of synchronization parameters on power

忽略有功功率的二阶小项变化, 定义准同期参数偏差引起的功率变化为  $\Delta P$  和  $\Delta Q$ , 由图7可得, 功率对各偏差的阶跃响应分别为:

$$\begin{cases} \Delta P(t) = G_{P\theta} \Delta\theta_{mg0} + G_{P\omega} \Delta\omega_{mg} \\ \Delta Q(t) = G_{QV} \Delta V_{mg} + k_{PQ} G_{P\theta} \Delta\theta_{mg0} + k_{PQ} G_{P\omega} \Delta\omega_{mg} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $G_{P\theta}$ ,  $G_{P\omega}$ ,  $G_{QV}$  和  $k_{PQ}$  的表达式详见附录C。

由式(7)可知, 准同期参数偏差以及系统参数对合闸功率瞬态的影响如表2所示。其中, “ $\uparrow$ ”表示

正相关, “ $\downarrow$ ”表示反相关, “—”表示不相关。

表2 合闸参数对合闸功率瞬态的影响  
Table 2 Transient impact of switching parameters on switching power

功率变化	$\Delta\theta_{mg0}$	$\Delta\omega_{mg}$	$\Delta V_{mg}$	$\omega_c$	$k_p$	$k_q$	$X$
$\Delta P$ 衰减速度	—	—	—	$\uparrow$	—	—	—
$\Delta P$ 振荡幅值	$\uparrow$	$\uparrow$	—	$\uparrow$	$\downarrow$	—	$\downarrow$
$\Delta P$ 振荡频率	—	—	—	$\uparrow$	$\uparrow$	—	$\downarrow$
稳态 $\Delta P$	—	$\uparrow$	—	—	$\downarrow$	—	—
$\Delta Q$ 衰减速度	—	—	—	$\uparrow$	—	$\uparrow$	$\downarrow$
$\Delta Q$ 非振荡暂态量	—	—	$\uparrow$	$\downarrow$	—	$\downarrow$	$\downarrow$
$\Delta Q$ 振荡幅值	$\uparrow$	$\uparrow$	—	$\uparrow$	$\downarrow$	—	$\uparrow$
$\Delta Q$ 振荡频率	—	—	—	$\uparrow$	$\uparrow$	—	$\downarrow$
稳态 $\Delta Q$	—	$\uparrow$	$\uparrow$	—	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$

假设负荷不变,  $\Delta P$  和  $\Delta Q$  将由电网承受, 从而引起电网电流的变化, 其幅值为:

$$I_g = \frac{2\sqrt{\Delta P^2 + \Delta Q^2}}{3V_g} \quad (8)$$

若准同期偏差阶跃量设置采用表1中500 kVA以下容量参数, 并网前功率为10 kW, 设置总电感量从2 mH变化到10 mH时, 功率变化如图8(a)至图8(e)所示。可见  $X$  越大,  $\Delta P$  和  $\Delta Q$  振荡频率越低,  $\Delta P$  振荡幅值越小,  $\Delta Q$  振荡幅值越大,  $\Delta Q$  非振荡暂态量越小,  $\Delta P$  稳态值不变,  $\Delta Q$  稳态值减小。结合式(8), 其结论与3.1节和表2分析相符。

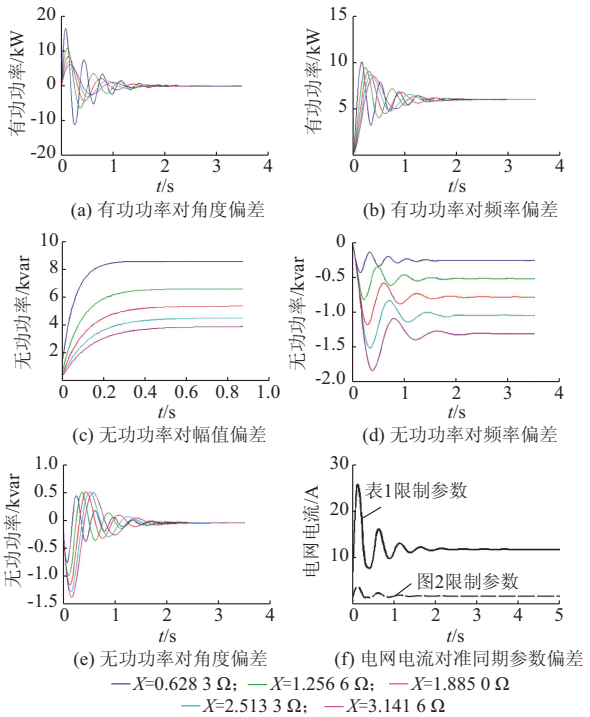


图8 总感抗变化时功率对准同期参数偏差的阶跃响应

Fig.8 Step responses of power on synchronization parameter deviation with different total inductances

由式(8)可得,总电感量为 4 mH 时,采用表 1 准同期偏差参数与本文设置的偏差参数(图 2),并网时刻的电网电流波形如图 8(f)所示。可见,表 1 限制参数引起的电网电流冲击较大,且电压偏差越小,电网电流越小。

基于以上分析可知,为减小并网时刻瞬态,可通过增加总系统阻抗或减小电压偏差来实现。然而,虚拟阻抗的取值需在均流和电能质量间进行权衡。从适应性而言,减小电压偏差是一种更有效、直接的方案。而 VCM-VSC 从孤岛到并网运行模式过渡时,微网与主电网之间的电压偏差将相应地反映到下垂环节输出指令的变化上,反之,如果希望减小并网前电压偏差,可通过适当的算法调节下垂曲线,使系统运行于并网后稳态工作点,这样,即可实现无冲击并网。

#### 4 基于 PLL 原理的主动同步控制算法

PLL 是目前三相系统使用最普遍的相位同步方法,是一种基于反馈控制原理实现频率及相位的同步技术,一般由鉴相器、环路滤波器、压控振荡器等组成一个反馈回路<sup>[29]</sup>。鉴相器比较输入输出的相位信号;环路滤波器,典型的为一个比例-积分(PID)调节器,使相位误差最小并提供优良的信号驱动压控振荡器;压控振荡器产生输出的振荡信号。基于该原理,本文采用的主动同步控制算法如图 9 所示。

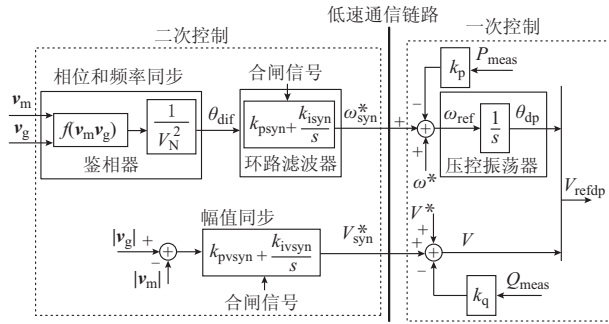


图 9 基于 PLL 原理的同步控制算法  
Fig.9 Control diagram of PLL-based synchronization control method

##### 4.1 鉴相器

2 个电压矢量叉积在按照右手定则方向上的投影如式(9)所示,进一步用两相静止坐标系  $\alpha\beta$  或两相同步旋转坐标系  $dq$  量表示为:

$$f(\mathbf{v}_m, \mathbf{v}_g) = |\mathbf{v}_m| |\mathbf{v}_g| \sin((\omega_g - \omega_m)t + \theta_{g0} - \theta_{m0}) = -v_{ga}v_{m\beta} + v_{g\beta}v_{m\alpha} - v_{gd}v_{mq} + v_{gq}v_{md} \quad (9)$$

可见,电压矢量的叉积可反映电压矢量之间的相位差。该相位差包括两个部分:一个为相角差;一个为频率引起的差值。同时,只有频率和相角均相等的情况下才始终为 0,因此其可用于频率和相角的同步控制。

同时可见,叉积的最大值为 2 个电压矢量幅值的乘积。因此,为了适应不同的电压等级和 PLL 设计参数的一致性,可进行归一化处理。考虑到 2 个电压矢量要满足合闸条件,均应该在额定电压附近,故可将电压矢量的叉积除以额定电压幅值的平方  $V_N^2$  来作为 PLL 的鉴相器。而 2 个电压矢量的叉积,可简单采用式(9)所示的两相静止坐标系  $\alpha\beta$  分量进行计算。 $\alpha\beta$  分量可由 abc 三相坐标量通过简单的 Clark 变换得到。其变换矩阵见附录 D。

##### 4.2 环路滤波器与压控振荡器

环路滤波器可采用典型 PI 调节器,其输出  $\omega_{syn}^*$  用于自动平移下垂特性曲线。而压控振荡器可由一次控制来实现,一次控制根据接收到的  $\omega_{syn}^*$  相应地平移频率下垂曲线,最终改变微网电压频率和相角。

##### 4.3 幅值同步控制

可由  $\alpha\beta$  分量计算主电网和微网电压的幅值,再通过简单的 PI 调节器进行偏差控制,其输出  $V_{syn}^*$  传递给一次控制,将相应地平移电压下垂曲线。

由于仅需传递  $\omega_{syn}^*$  和  $V_{syn}^*$ ,可仅依赖低速低带宽的通信。一旦合闸后,主动同步控制的输出将会保持或缓慢转至并网运行模式的协调控制。

##### 4.4 PLL 参数设计

基于以上分析,相角和频率同步原理可简化为图 10。其闭环传递函数为:

$$\frac{\theta_m}{\theta_g} = \frac{k_{psyn}(s + k_{isyn})}{s^2 + k_{psyn}s + k_{psyn}k_{isyn}} \quad (10)$$

式中:  $\theta_g$  为主电网相角;  $k_{psyn}$  和  $k_{isyn}$  为 PI 调节器参数。

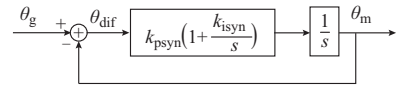


图 10 等效的相角和频率同步原理  
Fig.10 Frequency and phase synchronization principle

若期望调节时间为  $t_s$ ,并取阻尼系数为  $\zeta$ ,则

$$\begin{cases} k_{psyn} = \frac{9.2}{t_s} \\ k_{isyn} = \frac{2.3}{t_s \zeta^2} \end{cases} \quad (11)$$

微网孤岛运行时,频率一般需满足一定的范围,而要满足合闸条件,电网频率也应在一定范围内,因此,频率差值一般较小,相位偏差也不会快速变化。



- WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14.
- [4] 李鹏,张玲,王伟,等.微网技术应用与分析[J].电力系统自动化, 2009,33(20):109-115.  
LI Peng, ZHANG Ling, WANG Wei, et al. Application and analysis of microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 109-115.
- [5] 裴伟,李嵩森,李惠宇,等.微网运行控制的关键技术及其测试平台[J].电力系统自动化,2010,34(1):94-98.  
PEI Wei, LI Shusen, LI Huiyu, et al. Key technology and testbed for microgrid operation control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 94-98.
- [6] IEEE Std 1547.4—2011 IEEE guide for design, operation, and integration of distributed resource island systems with electric power systems [S]. New York, NY, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.
- [7] HU Shanghung, KUO Chunyi, LEE T L, et al. Droop controlled inverters with seamless transition between islanding and grid-connected operations[C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 17-22, 2011, Phoenix, AZ, USA; 2196-2201.
- [8] 杨占刚,王成山,车延博,等.可实现运行模式灵活切换的小型微网实验系统[J].电力系统自动化,2009,33(14):89-92.  
YANG Zhangang, WANG Chengshan, CHE Yanbo, et al. A small-scale microgrid system with flexible modes of operation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 89-92.
- [9] CHANG Chewei, CHANG Yungruei. Energy storage systems for seamless mode transfer in microgrid [C]// IEEE 9th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, December 5-8, 2011, Singapore; 799-802.
- [10] MAJUMDER R, GHOSH A, LEDWICH G, et al. Control of parallel converters for load sharing with seamless transfer between grid connected and islanded modes[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA; 7p.
- [11] 陈卫民,陈国呈,崔开涌,等.分布式并网发电系统在孤岛时的运行控制[J].电力系统自动化,2008,32(9):89-91.  
CHEN Weimin, CHEN Guocheng, CUI Kaiyong, et al. Running control of grid-connected dispersed generation systems in islanding situation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 89-91.
- [12] RIZO M, HUERTA F, BUENO E, et al. A synchronization technique for microgrid reclosing after islanding operation [C]// 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, October 25-28, 2012, Montreal, Canada; 5596-5601.
- [13] VANDOORN T L, MEERSMAN B, de KOONING J D M, et al. Transition from islanded to grid-connected mode of microgrids with voltage-based droop control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(3): 2545-2553.
- [14] LI Y, VILATHGAMUWA D M, LOH P C. Design, analysis, and realtime testing of a controller for multibus microgrid system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(5): 1195-1204.
- [15] JIA Y Q, LIU D K, LIU J. A novel seamless transfer method for a microgrid based on droop characteristic adjustment[C]// 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, June 2-5, 2012, Harbin, China; 362-367.
- [16] CHO C, JEON J H, KIM J Y, et al. Active synchronizing control of a microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 26(12): 3707-3719.
- [17] JIN C, GAO M Z, LV X F, et al. A seamless transfer strategy of islanded and grid-connected mode switching for microgrid based on droop control [C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 15-20, 2012, Raleigh, USA; 969-973.
- [18] ASSIS T M L, TARANTO G N. Automatic reconnection from intentional islanding based on remote sensing of voltage and frequency signals[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(4): 1877-1884.
- [19] 黄杏,金新民,童亦斌,等.具有快速并网功能的微网系统控制策略[J].北京交通大学学报,2012,36(5):7-13.  
HUANG Xing, JIN Xinmin, TONG Yibin, et al. A microgrid control method with fast resynchronization capability [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(5): 7-13.
- [20] LEE C T, JIANG R P, CHENG P T. A grid synchronization method for droop-controlled distributed energy resource converters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2013, 49(2): 954-962.
- [21] 牟晓春,毕大强,任先文.低压微网综合控制策略设计[J].电力系统自动化,2010,34(19):91-96.  
MOU Xiaochun, BI Daqiang, REN Xianwen. Control methods and strategies of microgrid smooth switchover[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 91-96.
- [22] VASQUEZ J C, GUERRERO J M, SAVAGHEBI M, et al. Modeling, analysis, and design of stationary reference frame droop controlled parallel three-phase voltage source inverters [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1271-1280.
- [23] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled DC and AC microgrids—a general approach towards standardization [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [24] GREEN T C, PRODANOVIC M. Control of inverter-based micro-grids [J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(9): 1204-1213.
- [25] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in AC microgrids[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [26] 马添翼,金新民,黄杏.含多变流器的微电网建模与稳定性分析[J].电力系统自动化,2013,37(6):12-17.  
MA Tianyi, JIN Xinmin, HUANG Xing. Modeling and stability analysis of microgrid with multiple converter [J].



Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 12-17.

[27] IEEE Std 1547—2003 IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems [S]. New York, NY, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.

[28] GUERRERO J M, GARCIADIVICUNA L, MATAS J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2005, 63(5): 1126-1135.

[29] BEST R E. Phase-locked loops: design, simulation and applications[M]. 6th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill

Professional, 2007.

唐 芬(1984—),女,通信作者,现在博士后工作站进行研究,主要研究方向:电力电子与电力传动、风力发电、微网系统控制等。E-mail: 06117294@bjtu.edu.cn

Josep M. GUERRERO(1973—),男,博士,教授,主要研究方向:电力电子与微电网控制。E-mail: joz@et.aau.dk

周 啸(1986—),男,博士研究生,主要研究方向:新能源发电技术。E-mail: 09117346@bjtu.edu.cn

(编辑 孔丽蓓)

An Active Synchronization Control Strategy for Fast and Smooth Integration of Microgrid

TANG Fen<sup>1</sup>, Josep M. GUERRERO<sup>2</sup>, ZHOU Xiao<sup>1</sup>, MA Tianyi<sup>1</sup>, Juan C. VASQUEZ<sup>2</sup>

(1. National Active Distribution Network Technology Research Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;  
2. Department of Energy Technology, Aalborg University, Aalborg 9220, Denmark)

**Abstract:** To guarantee a smooth transition from islanded mode to grid-connected mode, synchronization is the first issue to be considered. In this paper, a phase locked loop (PLL)-based active synchronization control approach is presented, which is implemented in the secondary control level of the microgrid hierarchical control structure by actively controlling the microgrid voltage to track the main grid. In this way, it can reduce the voltage difference to get the microgrid back into grid in minimum transient state. With the cross product of voltage vectors employed as the phase detector, the microgrid voltage frequency and phase are enabled to track the main grid at the same time. In addition, instead of fast communication to transmit signals in the time domain, the proposed method only needs a low-bandwidth communication link, which is simple and easy to implement. Finally, hardware-in-the-loop simulation and experiment results show the feasibility of the approach proposed.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A306).

**Key words:** phase locked loop (PLL); microgrid; grid-connected control; synchronization; hierarchical control

国电南瑞“高压直流输电换流阀水冷系统”通过鉴定

2014年3月11日上午,国电南瑞富通公司自主开发的“高压直流输电换流阀水冷系统”科技成果在北京顺利通过由中国电力企业联合会组织的专家鉴定。专家组一致认为该技术具有原创性,已达到国内领先水平。

换流阀是直流输电系统中的核心设备,由于长期在高电压、大电流下运行,会产生大量热量。热量如得不到及时、有效释放,发热的阀体会严重影响换流站正常工作。因此,需要设计水冷系统专为换流阀部件提供冷却功能。

该系统提供的循环冷却水可带走晶闸管工作损耗所产生的大量热量。系统可对冷却水进行温度、流量、水质等指标的精确调控,并能实现系统即时通信、控制和保护功能,保证换流阀正常工作温度和高压直流输电回路稳定运行。系统尤其在真空脱气技术、控制保护系统抗电磁干扰技术、管道布置、配水管路自动焊接技术等方面取得了创新性成果。目前,该系统已在上海柔性直流示范工程书柔换流站成功运行2年以上时间。

换流阀水冷系统技术顺利通过科技成果鉴定,标志着国电南瑞富通公司已完全掌握了高压直流输电换流阀水冷系统制造的工艺技术,拥有了完全自主的知识产权,并具备了换流阀水冷系统设计与生产能力。

【摘自南瑞集团公司网】